

Abschlussbericht
FerrAC-IRS
Ferrofluid Attitude Control
Teilvorhaben: Lageregelungssystem

FkZ: 50RK1973

Autoren: M. Ehresmann, G. Herdrich

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzdarstellungen	3
1.1. Aufgabenstellung.....	3
1.2. Voraussetzungen	3
1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens	4
1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	5
1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
1. Formale Zusammenarbeit.....	5
2. Informelle Zusammenarbeit	5
3. Externe informelle Zusammenarbeit	6
2. Eingehende Darstellung.....	7
Erzielte Ergebnisse	15
Schlussfolgerungen	15
Mittelverwendung und projektzielrelevante Ergebnisbewertung.....	15
Verwendung der Zuwendung	15
Erzielte Ergebnisse	15
Gegenüberstellung mit den vorgegebenen Zielen	17
2.1. Zahlenmäßiger Nachweis	17
2.2. Notwendigkeit und Angemessenheit der durchgeführten Arbeit	17
2.3. Verwertungsplan	18
2.4. Arbeiten anderer Stellen	19
2.5. Veröffentlichungen.....	21

1. Kurzdarstellungen

1.1. Aufgabenstellung

Das Projekt FerrAC (Ferrofluid Attitude Control) zielt darauf ab, ein neuartiges, ferrofluidbasiertes Reaktionsrad, im späteren Projektverlauf Ferrowheel genannt, zu entwickeln und zu testen. Das Hauptziel des Projekts besteht dabei darin, eine innovative Alternative zu herkömmlichen mechanischen Reaktionsrädern in Satellitensteuerungssystemen zu schaffen. Dieses Vorhaben ist durch die folgenden spezifischen Ziele charakterisiert:

1. **Entwicklung eines ferrofluidischen Reaktionsrads:** Entwerfen und Konstruieren von Prototypen des Ferrowheels, welche die traditionellen verschleißbehafteten mechanischen Komponenten durch Ferrofluid-basierte Konzepte zu ersetzen. Dies soll zu einer signifikanten Reduzierung von Verschleiß und Wartungsbedarf führen und potenziell die Produktionskosten senken.
2. **Nutzung von Ferrofluiden:** Erforschung und Anwendung der einzigartigen Eigenschaften von Ferrofluiden, einschließlich ihrer Manipulierbarkeit durch Magnetfelder und ihrer Eignung für den Weltraumeinsatz insbesondere in der Satellitenlageregelung.
3. **Systemqualifikation:** Realisierung und Auswertung von Tests und Experimenten mit dem Ferrowheel unter relevanten Testbedingungen.
4. **Analyse und Auswertung der Ergebnisse:** Sammlung, Analyse und Interpretation der Testdaten, um die Effizienz, Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit des Ferrowheels zu bewerten und zu validieren.

Das FerrAC-Projekt strebt danach, einen wesentlichen Beitrag zur Zukunft der Satellitentechnologie zu leisten, indem es robustere, wartungsärmere und möglicherweise kostengünstigere Steuerungssysteme für Raumfahrzeuge bietet. Diese Innovation soll die Zuverlässigkeit und Langlebigkeit von Satellitenmissionen erheblich verbessern und neue Möglichkeiten für die Raumfahrtindustrie sowie die Weltraumerkundung eröffnen.

1.2. Voraussetzungen

Das FerrAC-Projekt wurde unter folgenden Voraussetzungen durchgeführt:

1. **Wissenschaftliche und Technische Grundlagen:** Das FerrAC-Projekt baute auf den wissenschaftlichen Erkenntnissen und technischen Erfahrungen vorangegangener Forschungsinitiativen auf, insbesondere auf den Ergebnissen des PAPELL-Experiments auf der ISS. Diese Basis wurde genutzt, um die besonderen Eigenschaften von Ferrofluiden für die Entwicklung eines mechanikfreien Reaktionsrades zu erschließen.
2. **Technische Ressourcen und Infrastruktur:** Das Projekt hatte Zugriff auf die Laboreinrichtungen des Instituts für Raumfahrtsysteme, darunter ein spezialisiertes Labor für die Handhabung verschiedener Chemikalien und Gase. Zusätzliche Zugang technische Ausrüstungen waren entscheidend für die Entwicklung, Herstellung und das Testen der Prototypen sowie Aufbau und Entwicklung relevanter Testapparate.
3. **Interdisziplinäres Team:** Das Team des Instituts für Raumfahrtsysteme bestand aus Wissenschaftspersonal und Ingenieurkräften, Fachkräften aus Mechanik und Elektrotechnik sowie Studierenden, die bereits Erfahrungen aus dem PAPELL-Experiment^{1,2} mitbrachten. Diese Teammitglieder verfügten über Fachkenntnisse in den Bereichen Raumfahrttechnik, Materialwissenschaften, Physik, Chemie und Elektrotechnik. Die Industrie-Expertise des

¹<https://www.dlr.de/en/research-and-transfer/projects-and-missions/horizons/high-flyers>

²<https://www.nasa.gov/mission/station/research-explorer/investigation/?#id=7731>

Projektpartners Astos Solutions war zudem besonders wertvoll, um die Eigenschaften für Reaktionsräder realitätsnah und praxisorientiert zu definieren.

Diese Voraussetzungen bildeten die Basis für die erfolgreiche Durchführung und den Abschluss des FerrAC-Projekts, welches darauf abzielte, ein innovatives, ferrofluidbasiertes Reaktionsrad zu entwickeln und zu testen.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das FerrAC-Projekt wurde mit einer klar definierten Planungs- und Ausführungsstrategie durchgeführt, um ein innovatives ferrofluidbasiertes Reaktionsrad, das Ferrowheel, zu entwickeln. Die Planung beinhaltete mehrere Schlüsseltappen:

1. **Anfangsphase und Konzeptentwicklung:** In dieser Phase wurden die grundlegenden Ideen und Konzepte für das Ferrowheel entwickelt. Dazu gehörten die Auswahl geeigneter Materialien, die Erarbeitung verschiedener konzeptioneller Entwürfe und die Definition der technischen Anforderungen wie Drehmoment, Drehimpuls, Volumen, etc..
2. **Prototypenentwicklung und Labortests:** Nach der Konzeptphase folgte die Entwicklung von Prototypen. Dieser Prozess umfasste die Herstellung der Komponenten, die Montage der Prototypen und erste Labortests, um die Grundfunktionalität zu überprüfen.
3. **Anpassungen aufgrund der COVID-19-Pandemie:** Während der Projektlaufzeit kam es aufgrund der COVID-19-Pandemie zu unvorhergesehenen Herausforderungen. Die Zugänglichkeit zu den Laboreinrichtungen des Instituts für Raumfahrtssysteme war eingeschränkt, was zu Verzögerungen im Entwicklungs- und Testprozess führte. Diese Situation erforderte eine flexible Anpassung des Projektmanagements und der Zeitpläne.
4. **Kostenneutrale Verlängerung:** Aufgrund der durch die Pandemie bedingten Einschränkungen wurde eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts um sechs Monate gewährt. Diese zusätzliche Zeit wurde genutzt, um die Entwicklung und Tests der Prototypen unter den veränderten Bedingungen fortzusetzen.
5. **Weltraumexperimente und Datensammlung:** Trotz der Verzögerungen gelang es im Rahmen des FerrAC Projekts den vielversprechendsten Prototypen für Weltraumexperimente für den Einsatz als Teilexperimente des KSat e.V. Projekts FARGO vorzubereiten.
6. **Abschlussphase und Nachbereitung:** Nach der Wiederaufnahme des regulären Betriebs in den IRS-Laboren konnten die letzten Entwicklungs- und Testarbeiten abgeschlossen werden. Die Prototypen wurden finalisiert und erfolgreich die Weltraumexperimente des Reaktionsrades im März/April 2023 auf der ISS durchgeführt. Nach den erfolgreichen Tests folgte die Auswertung der gesammelten Daten und die Vorbereitung des Abschlussberichts.

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

1.4.1. Schutzrechte

Das FerrAC-Projekt basiert maßgeblich auf den Erkenntnissen und Ergebnissen des vorangegangenen PAPELL-Projekts, welches unter dem Förderkennzeichen 50JR1705 durchgeführt wurde. Die im Rahmen des PAPELL-Projekts gesammelten Daten und Erfahrungen, insbesondere hinsichtlich des Verhaltens und der Anwendungen von Ferrofluiden in der Raumfahrt, bildeten eine fundamentale Grundlage für die Entwicklung des FerrAC-Projekts. Während des FerrAC-Projekts wurden keine aktiven Schutzrechte verwendet oder verletzt. Das Projektteam hat sorgfältig darauf geachtet, dass die Entwicklung des Ferothwheels und die damit verbundenen Technologien unabhängig und frei von bestehenden Schutzrechten sind, um rechtliche Komplikationen zu vermeiden und die Innovation im Rahmen des Projekts eigenständig voranzutreiben.

1.4.2. Anmeldung von Schutzrechten

Mit direktem Projektbezug zu FerrAC befindet sich ein EP-Patent in der Anmeldung: [DE] Vorrichtung zur Erzeugung eines variablen Drehimpulses, insbesondere zur Lageregelung von Raumfahrzeugen, [EP000003904220A4](#)

Mit indirektem Bezug zu FerrAC hat sich außerdem ein weiteres DE-Patent aus Nebenentwicklungen ergeben:

[DE] Schaltvorrichtung zum Schalten elektrischer und/oder thermischer Lasten mit Hilfe magnetisierbarer Flüssigkeit, [DE102022109433A1](#)

1.4.3. Verwendeten Fachliteratur und Informationsdienste

Im Verlauf des FerrAC-Projekts wurde eine umfangreiche Internetrecherche durchgeführt, um fachspezifische Publikationen zu identifizieren, die für das Projekt relevant sind. Diese Recherche war entscheidend, um aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse und technologische Entwicklungen zu berücksichtigen, die das Projekt unterstützen und leiten könnten. Die gefundenen Publikationen und Quellen lieferten wertvolle Informationen und Einblicke, die maßgeblich zur Entwicklung und zum Erfolg des FerrAC-Projekts beigetragen haben. Die spezifischen Referenzen und Quellen, die während des Projekts verwendet wurden, sind detailliert in den jeweiligen Projektveröffentlichungen aufgeführt, um Transparenz zu gewährleisten und die Nachvollziehbarkeit der Forschungsarbeit zu ermöglichen. Diese methodische Herangehensweise bei der Literaturrecherche hat sicher gestellt, dass das Projekt auf einem soliden und aktuellen Wissensfundament aufgebaut wurde.

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des FerrAC-Projekts wurde eine wertvolle Zusammenarbeit auf verschiedenen Ebenen gepflegt, die maßgeblich zum Erfolg des Projekts beitrug:

1. Formale Zusammenarbeit

Astos Solutions GmbH: Als KMU mit ausgeprägter Expertise im Bereich der Raumfahrt-Software leistete der Projektkooperationspartner Astos Solutions einen wesentlichen Beitrag zur Analyse der Eigenschaften von Reaktionsrädern, zur Durchführung von Marktstudien und zur Unterstützung der industriellen Fertigung. Diese formale Kooperation ermöglichte es, praxisnahe Lösungen und kommerziell relevante Perspektiven in das Projekt einzubringen.

2. Informelle Zusammenarbeit

KSat e.V. an der Universität Stuttgart: Die Zusammenarbeit mit der studentischen Kleinsatellitengruppe erfolgte auf drei wesentlichen Ebenen:

1. **Einsatz und Beratung durch erfahrene Studierende:** Studierende, die bereits im PABELL-Projekt mitgewirkt hatten, brachten ihre Expertise in der Entwicklung von Ferrofluidanwendungen ein und unterstützten das FerrAC-Projekt mit ihrem wertvollen Wissen.
 2. **Durchführung des FARGO-Projekts auf der ISS:** Ein Studierendenteam führte ein Experiment durch, das die auf FerrAC entwickelte Ferrowheel-Technologie auf der ISS erprobte, was entscheidende Einblicke in das Verhalten der Technologie unter Weltraumbedingungen lieferte.
 3. **Einsatz von KSat-Studierenden:** Sie unterstützten als wissenschaftliche Hilfskräfte bei Entwicklungsarbeiten, wodurch das FerrAC-Projekt von ihrer Dynamik und Innovationskraft profitierte.
3. Externe informelle Zusammenarbeit
1. **ZARM in Bremen:** Die Entwicklung eines ferrofluidischen Thermalmanagementsystems bei ZARM bot wertvolle Erkenntnisse und Anregungen für ähnliche Anwendungen im FerrAC-Projekt.
 2. **TU Berlin:** Die Entwicklung einer MHD (Magnetohydrodynamik) Pumpe zur Satellitenlageregelung, basierend auf Flüssigmetall und Lorentzkräften, lieferte zusätzliche Impulse und ermöglichte einen fachlichen Austausch, der zur Weiterentwicklung der Technologien im FerrAC-Projekt beitrug.

Diese vielschichtige und interdisziplinäre Zusammenarbeit ermöglichte es dem FerrAC-Projekt, von einem breiten Spektrum an Expertise zu profitieren und innovative Lösungen im Bereich der Satellitensteuerung zu entwickeln.

2. Eingehende Darstellung

Das FerrAC-Projekt (Ferrofluid Attitude Control) stellt einen innovativen Ansatz in der Entwicklung von Lageregelungssystemen (Attitude Control System - ACS) für Satelliten dar, wobei der Schwerpunkt auf der Ausnutzung von Ferrofluiden und damit verbundenen einzigartigen Eigenschaften liegt. Diese paramagnetischen Flüssigkeiten, die feine ferromagnetische Partikel enthalten, bieten einzigartige Eigenschaften, die sie für die Raumfahrt besonders interessant machen. Sie reagieren auf ausreichend starke magnetische Felder und können ihre Form und Position ändern, was sie interessant für magnetische Aktuation macht und damit simple Systeme ohne mechanisch-bewegliche Teile konzeptioniert werden können.

Derartige Alternativesysteme ohne bewegliche Teile gewinnen in der Raumfahrt zunehmend an Bedeutung, da sie eine Vielzahl wesentlicher Vorteile im Vergleich zu klassischen mechanischen Lösungen in der herausfordernden Umgebung des Weltraums bieten. Ein Hauptvorteil dieser Systeme ist ihre erhöhte Zuverlässigkeit und Langlebigkeit. Bewegliche Teile sind in der Regel anfällig für Verschleiß durch ständige mechanische Beanspruchung, was im Weltraum, wo Reparaturen extrem schwierig und kostspielig sind, zu signifikanten Problemen führen kann. Der Einsatz von Systemen ohne bewegliche Teile reduziert dieses Risiko erheblich, erhöht die Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Raumfahrtmissionen und verringert gleichzeitig den Wartungsaufwand und die damit verbundenen Kosten.

Darüber hinaus bieten diese Systeme auch in Bezug auf Energieeffizienz relevante Vorteile, da bewegliche Teile häufig zusätzliche Energie benötigen, beispielsweise um Reibung zu überwinden. In einer Umgebung, in der jede Energiequelle von großem Wert ist, stellen Ferrofluid-basierte Systeme daher einen erheblichen Vorteil dar. Eine vereinfachte Konstruktion und Integration, die durch den Verzicht auf bewegliche Teile ermöglicht wird, erleichtert nicht nur den Entwicklungsprozess, sondern kann auch zur Reduzierung der Gesamtmasse der Raumfahrzeuge im Sinne des Leichtbaus beitragen. Dies ist ein entscheidender Aspekt in der Raumfahrt, wo die Transportkosten pro Kilogramm Nutzlast sehr hoch sind.

Zusätzlich verringern Systeme ohne bewegliche Teile den Qualifikationsaufwand im Vergleich zu komplexeren Systemen mit beweglichen Teilen erheblich. Komplexe mechanische Systeme erfordern normalerweise umfangreiche und langwierige Testphasen, um ihre Zuverlässigkeit und Eignung für den Weltraumeinsatz zu gewährleisten. Diese Tests sind nicht nur zeitaufwendig, sondern auch kostenintensiv und benötigen oft spezialisierte Ausrüstung und Fachwissen. Durch den Verzicht auf bewegliche Teile wird dieser umfangreiche Testaufwand weitgehend eliminiert, was zu einer signifikanten Beschleunigung der Entwicklungszyklen und Kosteneinsparungen führt. Dies macht Systeme ohne bewegliche Teile zu einer besonders attraktiven Option für Raumfahrtanwendungen, da sie nicht nur die Zuverlässigkeit und Lebensdauer erhöhen, sondern auch den gesamten Entwicklungs- und Qualifikationsprozess von Raumfahrtkomponenten vereinfachen und effizienter gestalten.

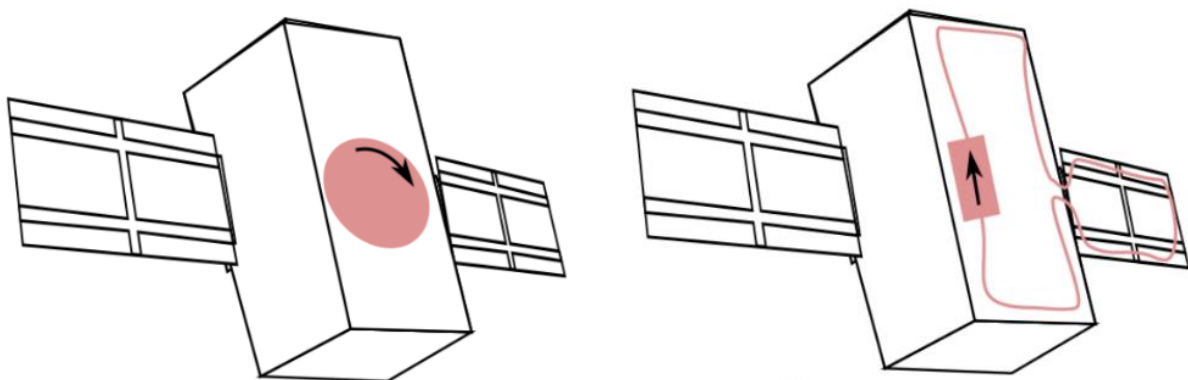


Abbildung 1 Konzeptionell verschiedene Lageregelungskonzepte. Links: klassischer Einsatz einer drehendes Masse mit gespeichertem Drehimpuls. Rechts: Ansatz mit einem Pumpensystem und Fluidverteilung über das Raumfahrzeug hinweg, potentielle Hybridnutzung als Thermalkontrollsystem möglich.

Mechanische Lageregelungssysteme sind komplex und fehleranfällig. Trotz erheblicher Investitionen in Entwicklung, Kosten und Qualifizierungsverfahren bleiben Missionsrisiken bestehen. Um nur einige Beispiele zu nennen: Im Jahr 2022 musste das Neil Gehrels Swift Observatorium (SWIFT) aufgrund des Ausfalls eines seiner Reaktionsräder in den Sicherheitsmodus wechseln. Ein weiterer Fall ist der Klein-Satellit CASSIOPE, der 2018 gestartet wurde und Ende 2021 einen Ausfall eines Reaktionsrades erlebte. Dies führte anschließend zum Ausfall von zwei weiteren Rädern, was letztendlich zur Beendigung der Mission führte. Eine wirksame Strategie zur Verminderung von Verschleiß besteht in der Beseitigung mechanischer Schnittstellen. Ein vielversprechender Ansatz ist die Verwendung von Ferrofluiden – Flüssigkeiten, die auf magnetische Felder reagieren. Diese Technik wurde erfolgreich im PAPELL-Experiment erforscht, das grundlegende Manipulationsexperimente mit Ferrofluiden an Bord der Internationalen Raumstation (ISS) durchführte.

Ein zentrales Element des Projekts ist die Entwicklung und Untersuchung von Lageerlungskonzepten welche ohne mechanisch Schnittstellen auskommen können und damit verschleißarm sein können. Der Vorteil dieser Technologie liegt in der Vermeidung von Abnutzung und Verschleiß, die normalerweise bei mechanischen Systemen auftritt. Dadurch wird die Lebensdauer und Zuverlässigkeit des Systems erheblich erhöht. Reduktion von Reibung wiederum kann zu einer vergleichsweise höheren Energieeffizienz führen.

Das Konzept einer innovativen Lageregelung, dargestellt in Abbildung 1 auf der rechten Seite, präsentiert eine interessante Methode zur Drehimpulsspeicherung in der Arbeitsflüssigkeit des Systems. Dies wird durch den Einsatz einer einfachen Pumpe in Kombination mit einem Rohr- oder Schlauchsystem erreicht. Veränderungen in der Fließgeschwindigkeit der Flüssigkeit modifizieren den gespeicherten Drehimpuls, was wiederum ein Drehmoment erzeugt, das für die Lageregelung verwendet werden kann. Zusätzlich bietet dieses System die Möglichkeit, weitere typische Aufgaben von Satellitensystemen zu übernehmen und können individuell an die Anforderungen von Raumfahrzeugen angepasst werden, beispielsweise die Thermalkontrolle (→ hybride Konzepte). Diese Vielseitigkeit macht es zu einer vielversprechenden Option für Satellitenanwendungen.

Die technische Herausforderung dieses Konzepts im Sinne die Zielsetzung von FerrAC ist eine solche Pumpe ohne bewegliche Teile zu entwerfen und zu erproben. Hier wurden zwei konkrete Ansätze verfolgt die Linearpumpe und die Verdrängerpumpe.

Draufsicht -Schnittbild

Queransicht

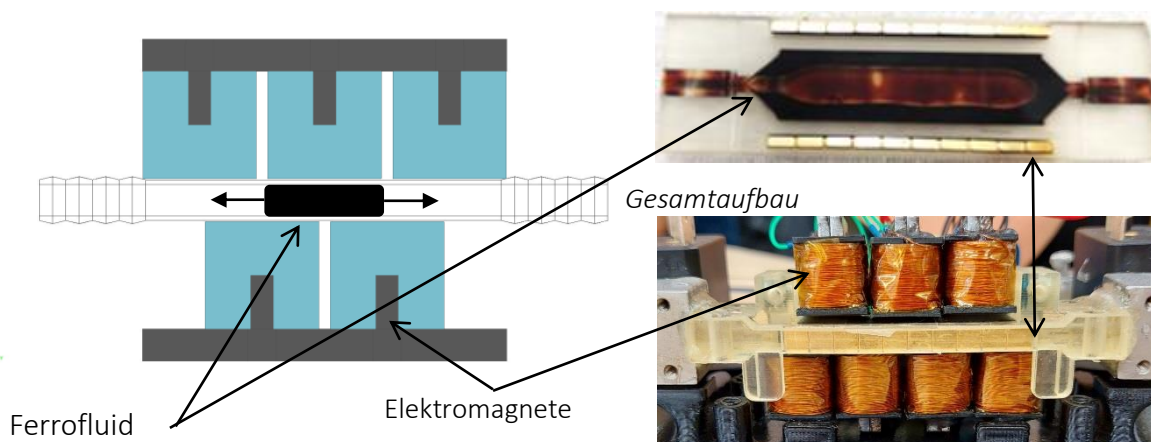


Abbildung 2 Konzept der Linearpumpe. Links Draufsicht mit durch magnetischen Jochen verbundene Elektromagnete. Rechts oben: Queransicht eines Prototypen mit Ferrofluid angelagert durch Permanentmagnete in Reservoiren.. Durch die Zick-Zack Anordnung der Elektromagnet kann sich ein Magnethügel ausbilden, welches eine Einschnürung der Sekundär-/Arbeitsflüssigkeit durch das Ferrofluid ausbildet und sich im Kanal, hier von links nach rechts fortbewegt. Pumpgeschwindigkeit, Pumprichtung, als auch mehrfache Einschnürungen sind prinzipiell frei wählbar in diesem Pumpkonzept.

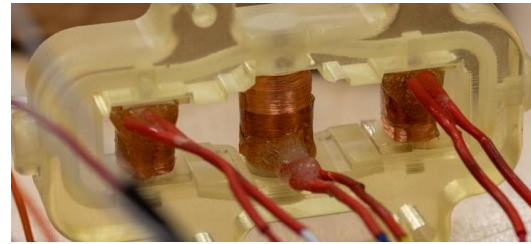
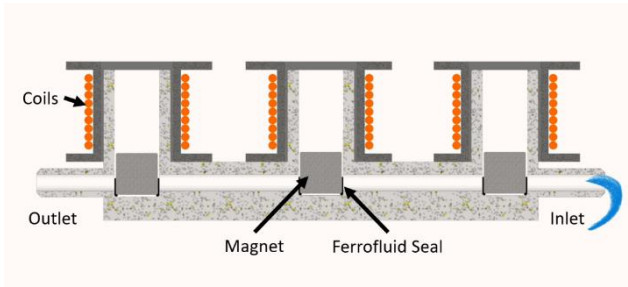


Abbildung 3 Links: Konzept der einfachen Verdrängungspumpe. Ferrofluid benetzte Permanentmagnete haben die Rolle eines Ventils und verdrängenden Kolbens, durch wellenförmiges Heben und Senken der Kolben, ausgelöst durch spulengesteuerte Magnetfelder, kann eine gezielte Flussrichtung von rechts nach links erzielt werden. Eine einfachere Version mit Ferrofluidtropfen allein ist möglich, aber weniger effektiv im Sinne von erreichbarer Flussleistung und weniger Leistungseffizient. Rechts: Ein Prototyp mit Doppelstromprinzip (zusätzlicher Strömungskanal oberhalb) würde prinzipiell eine Verdoppelung der Pumpleistung ermöglichen, da immer beide Kanäle abwechselnd ziehen und schieben pumpen.

Das Funktionsprinzip der Linearpumpe ist von der Arbeitsweise einer Peristaltikpumpe inspiriert. Bei einer Peristaltikpumpe wird ein flexibler Schlauch durch Rollen geklemmt, die entlang des Schlauches bewegt werden, um dessen Inhalt zu pumpen. Ein analoger Effekt wird bei der Linearpumpe mit Ferrofluid erreicht, indem ein Kanal zwischen zwei Ferrofluidreservoirs geschaffen wird, die durch Permanentmagnete in Position gehalten werden, siehe Abbildung 2. Entlang dieses Kanals sind Elektromagnete montiert, die senkrecht angeordnet sind und das Ferrofluid aus den Reservoirs in den Kanal ziehen können, indem sie zwischen den verschiedenen Elektromagneten umschalten. Am Ende des Kanals wird das Ferrofluid wieder in die Reservoirs aufgenommen. Mit diesem Pumpendesign wurden Pumpgeschwindigkeiten von 11,3 ml/min für Isopropanol/Wasser-Gemische in einer 50 cm langen Schlaufe mit einem Innendurchmesser von 3 mm verzeichnet. Während des Betriebs ist die Pumpe lautlos und erzeugt keine wahrnehmbaren Vibrationen. Das einzige bewegliche Teil ist das Ferrofluid, das sich nahezu reibungslos mit Hilfe magnetischer Kräfte bewegt

Die Verdrängerpumpe oder Membranpumpe verwendet einen Tropfen Ferrofluid als Ersatz für einen herkömmlichen Kolben. Dieser Tropfen wird durch Elektromagneten manipuliert, wodurch eine entsprechende Bewegung der sekundären Flüssigkeit erzeugt wird. Es ist auch untersucht worden ob in dieser Konfiguration passive feste Geometrieventile (Tesla-Ventile) und auf Ferrofluid basierende Ventile geeignet sind, dass der Fluss der sekundären Flüssigkeit in eine Hauptfließrichtung gelenkt wird, siehe Abbildung 3. In einer späteren Iteration wurden die Ferrofluidtropfen durch von Ferrofluid-benetzte Magnete ersetzt da diese eine stärkere Einkopplung der magnetischen Kräfte über die Magnetbewegung in das Sekundärfluid erlauben. Ebenso ist hier die dichtende Wirkung von Ferrofluid effektiver als bei reinen Ferrofluidtropfen, welche auch schon bei geringen Differenzdrücken undichtes Verhalten zeigen können. Diese Pumpe zeigt Flussraten von über 60 ml/min und stellt also einen Vorteil im Sinne von erreichbarem Volumentrstrom zur Linearpumpe dar.

Beide Pumpkonzepte (Linear- und Verdrängung) wurden im Rahmen von FerrAC nicht weiter im Detail verfolgt, da die erwartbaren Pumpleistungen nur begrenzt für eine effektive Lageregelung geeignet sind. Eine kurzzeitige Änderung der Flussgeschwindigkeit erzeugt per Definition auch immer ein großes Drehmoment, aber ein effektives Lageregelungssystem muss auch dauerhaft relevante Drehimpulse speichern können, was hier durch die Begrenzung der maximalen Flussgeschwindigkeit limitiert wird. Die untersuchten Konzepte bieten aber auch neben der Satellitenlageregelung interessante Anwendungsfälle in der Feinausrichtung von Satelliten, sowie das Flüssigkeits- und Thermalmanagement. Daher werden diese Konzepte im Rahmen des REXUSBEXUS Höhenforschungsprojekt FerrAS durch ein Team von Studierenden von KSat e.V. der Uni Stuttgart weiterverfolgt. Ein Start und damit Funktionstests in wenigen Minuten Mikrogravitation sind in Q1 2024 vorgesehen.

Die Alternative zu den vorherigen Konzepten ist eine kompakte rotierende Masse im Raumfahrzeug zu verwenden, Abbildung 1, links bzw. die konkreten Prototypen in Abbildung 5. Das Konzept des rein fluidischen Reaktionsrades, eine neuartige Entwicklung in der Raumfahrttechnologie, speziell für Lageregelungssysteme von Satelliten, stellt einen signifikanten Fortschritt dar. Dieses Konzept, dessen

Patentierung bereits in Angriff genommen wurde, nutzt die Eigenschaften von Ferrofluid in Kombination mit einer unmagnetischen Sekundärflüssigkeit, um durch rotierende Magnetfelder ein Reaktionsmoment zu erzeugen. Die Steuerung dieser Magnetfelder ermöglicht die Anpassung der Drehzahl, und damit des gespeicherten Drehimpulses sowie des erzeugten Drehmoments.

Ein wesentlicher Vorteil dieses Designs besteht in der erheblichen Reduktion der Ausfallwahrscheinlichkeit durch den Verzicht auf mechanische Komponenten, was sowohl die Herstellungs- als auch die Betriebskosten senkt. Jedoch wurden bei der Umsetzung dieses Konzepts gewisse Einschränkungen festgestellt, insbesondere in Bezug auf die erreichbaren maximalen Drehzahlen ($< 60 \text{ U/min}$). Diese Begrenzung resultiert aus der begrenzten maximalen Magnetisierung des Ferrofluids, was wiederum eine eingeschränkte Einkopplung von magnetischen Kräften zur Folge hat. Entsprechend ist auch die Übertragung des Impulses an die unmagnetische Sekundärflüssigkeit über Oberflächenkräfte und Drücke begrenzt. Zusätzlich trägt auch die innere Reibung innerhalb des Flüssigkeitsbeckens zu einer erhöhten Gesamtreibung bei, was die Energieeffizienz des Systems weiter beeinträchtigt.

Ein untersuchter Ansatz zur Leistungssteigerung war die Erforschung von magnetischem Galinstan. Dieses Material wird hergestellt, indem man mikrometergroße Eisenpartikel zum flüssigen Metall Galinstan (einer Legierung aus Gallium, Indium und Zinn) hinzufügt, um eine magnetisierbare Flüssigkeit mit vergleichsweise hoher Dichte zu erhalten. Ähnlich wie Ferrofluid ist auch Galinstan grundsätzlich magnetisch steuerbar. Allerdings zeigt es in seiner aktuellen Form keine Langzeitstabilität und ist anfällig für Oxidation. Oxidiertes Galinstan nimmt eher eine gelartige statt flüssige Konsistenz an und ist somit schwierig in für FerrAC relevanten Anwendungsfällen einzusetzen.

Trotz dieser Herausforderungen bietet das Konzept des rein fluidischen Reaktionsrades insgesamt eine fortschrittliche und effiziente Alternative zu traditionellen mechanischen Reaktionsrädern. Es überzeugt durch seine Einfachheit, Zuverlässigkeit und Langlebigkeit und markiert einen bedeutenden Schritt in Richtung zukünftiger mechanikfreier Entwicklungen in der Raumfahrttechnologie.

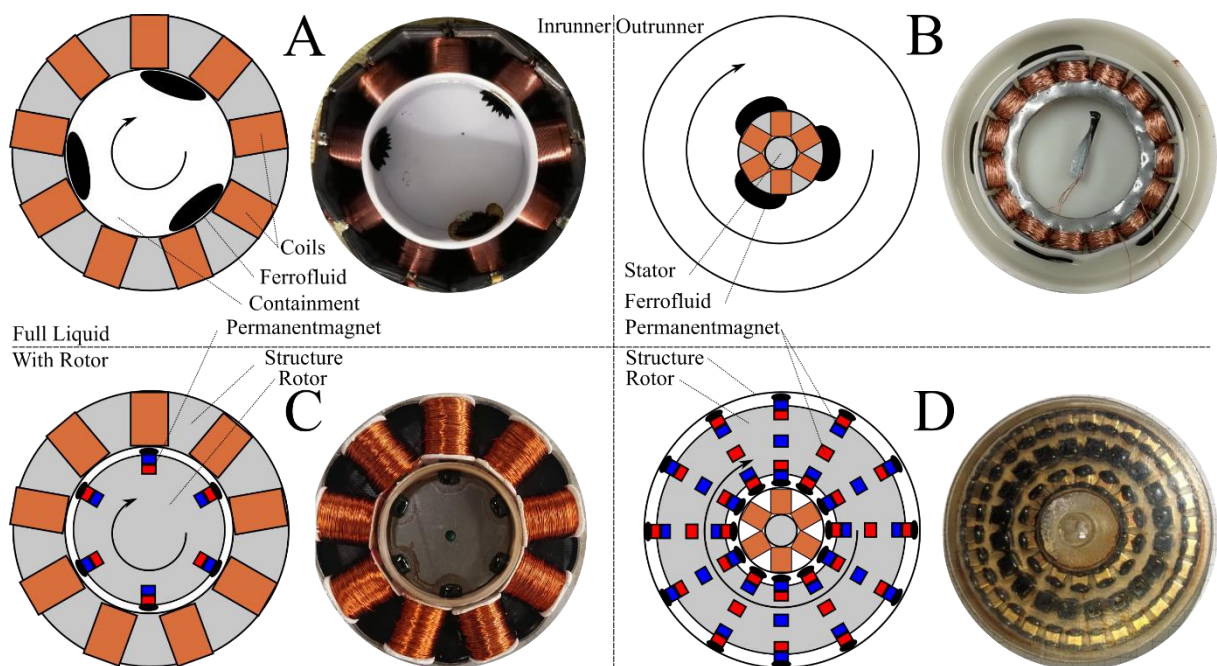


Abbildung 4 Untersuchte Reaktionsrad Alternativkonzepte im Rahmen von FerrAC. Obere Zeile: rein fluidische Systeme. Untere Zeile ferrofluidisch gelagerte Systeme. Linke Spalte: Innenläufer Systeme. Rechte Spalte: Außenläufer Systeme.

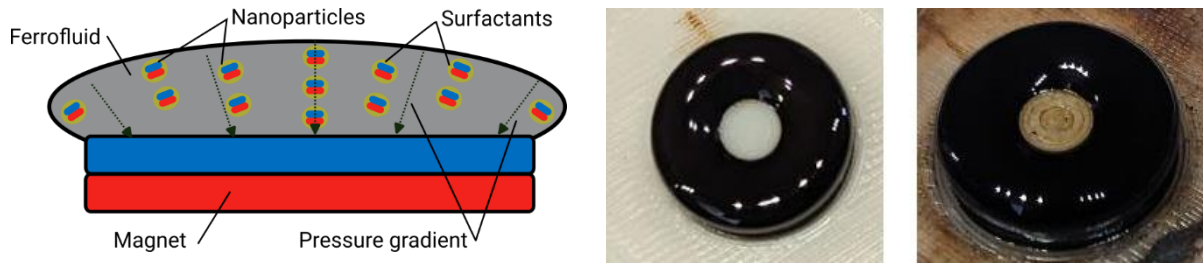


Abbildung 5 Links: schematische Darstellung des Aufbaus magnetischen Drucks innerhalb eines Tropfenferrofluids auf einem Permanentmagneten. Die Tendenz der Partikel zum Magnetpol zu streben summiert sich zu steigendem Druck mit der Tiefe im Ferrofluidtropfen. Rechts Beispiele von Ferrofluidlagern auf Toroidmagneten, es bildet sich eine „perfekt“ glatte Ferrofluidoberfläche aus, auf der ein Magnet selbst oder auch unmagnetische Objekte schwimmen können. Die Ferrofluidträgerflüssigkeit, ein Öl, definiert hier das entscheidende geringe Reibungsverhalten auf der spiegelglatten Oberfläche..

Wie in der Verdrängungspumpe ist eine signifikante Aufwertung durch den direkten Einsatz von starken Permanentmagneten (ugs. Neodymmagnete) zu erzielen. Um das Ziel der Verschleißfreiheit der FerrAC Technologie zu erreichen, müssen mechanische Schnittstellen auch beim Einsatz von Permanentmagneten ausgeschlossen werden. Hierfür ist die Nutzung eines speziellen Effekts von Ferrofluiden notwendig, dem magnetischen Druck.

Zentral für das Verständnis dieses Phänomens ist die Eigenschaft der magnetischen Partikel in Ferrofluiden, sich in Richtung der stärksten magnetischen Feldstärke zu bewegen. Diese Bewegung, die durch ein externes Magnetfeld induziert wird, führt zu einer spezifischen Druckverteilung im Fluid, analog zum statischen Druck in einem Gravitationsfeld, siehe Abbildung 5 links. Eine besondere Eigenschaft dieses Effekts ist die Möglichkeit, nicht magnetische Materialien aus dem mit magnetischen Druck beaufschlagten Ferrofluid zu verdrängen. Die ferromagnetischen Nanopartikel im Fluid unterliegen einer magnetischen Kraft, die sie zu den Bereichen des stärksten magnetischen Gradienten zieht. Dieses Verhalten ist analog zu Objekten in einem Gravitationsfeld, die sich zum Punkt der stärksten Gravitationskraft bewegen. Infolgedessen bildet sich innerhalb des Ferrofluids ein Druckgradient, der minimal an der Oberfläche und maximal am Ort der stärksten magnetischen Feldstärke ist. Dieser durch das Magnetfeld induzierte Druck ist ein wesentlicher Faktor für das Verständnis des Verhaltens von Ferrofluiden. Er ist entscheidend für die Erklärung verschiedener Phänomene, wie etwa die Veränderung der Viskosität oder die Entstehung charakteristischer Oberflächenmuster unter dem Einfluss eines Magnetfelds, beispielsweise dem sogenannten Rosensweig-Effekt. Darüber hinaus kann dieser magnetische Druck genutzt werden, um eine tragende und damit lagernde Kraft zu erzeugen, die für technologische Anwendungen von großer Bedeutung. Beispielsweise werden ferrofluidische Lagerungen für mechanisch rotierende Durchführungen in Vakuumkammern verwendet, da diese auch aufgrund des magnetischen Drucks eine perfekte atomare Dichtung darstellen.

Für das FerrAC Projekt ist vor allem die lagernde Eigenschaft des magnetischen Drucks wichtig, um ein Reaktionsrad mit Permanentmagneten gelagert auf Ferrofluidkissen zu realisieren. In herkömmlichen mechanischen Reaktionsrädern sind Lager oft eine Quelle für mechanischen Verschleiß und begrenzen damit die Lebenszeit des Systems. Durch die Verwendung von Ferrofluiden als Lagermaterial wird dieser Nachteil umgangen. Diese Ferrofluidlager ermöglichen eine berührungsfreie, selbststabilisierende Lagerung, wodurch die Notwendigkeit für Wartung und die Risiken von Verschleiß minimiert werden. Der selbststabilisierende Effekt ist auch in Abbildung 5 rechts ersichtlich. Die ausgebildeten Ferrofluidkissen passen sich dem anliegenden magnetischen Potential an. Ein hinzufügen oder wegnehmen von Ferrofluid ergibt immer wieder eine neue, ideal rotationssymmetrische Geometrie des Lagerkissens.

Das zentrale Ergebnis des FerrAC-Projekts ist die Entwicklung des sogenannten Ferrowheels, einer innovativen Variante des Reaktionsrades, das Ferrofluid als Hauptkomponente verwendet. Dieses Rad nutzt ein Ferrofluidlager, um sowohl eine schwebende Lagerung als auch Rotation zu ermöglichen, siehe Abbildung 4 Konzept D. Ähnlich wie bei herkömmlichen mechanischen Reaktionsrädern wird durch

die Veränderung der Rotationsgeschwindigkeit ein Drehmoment erzeugt, wodurch sich die Menge des gespeicherten Drehimpulses ändert.

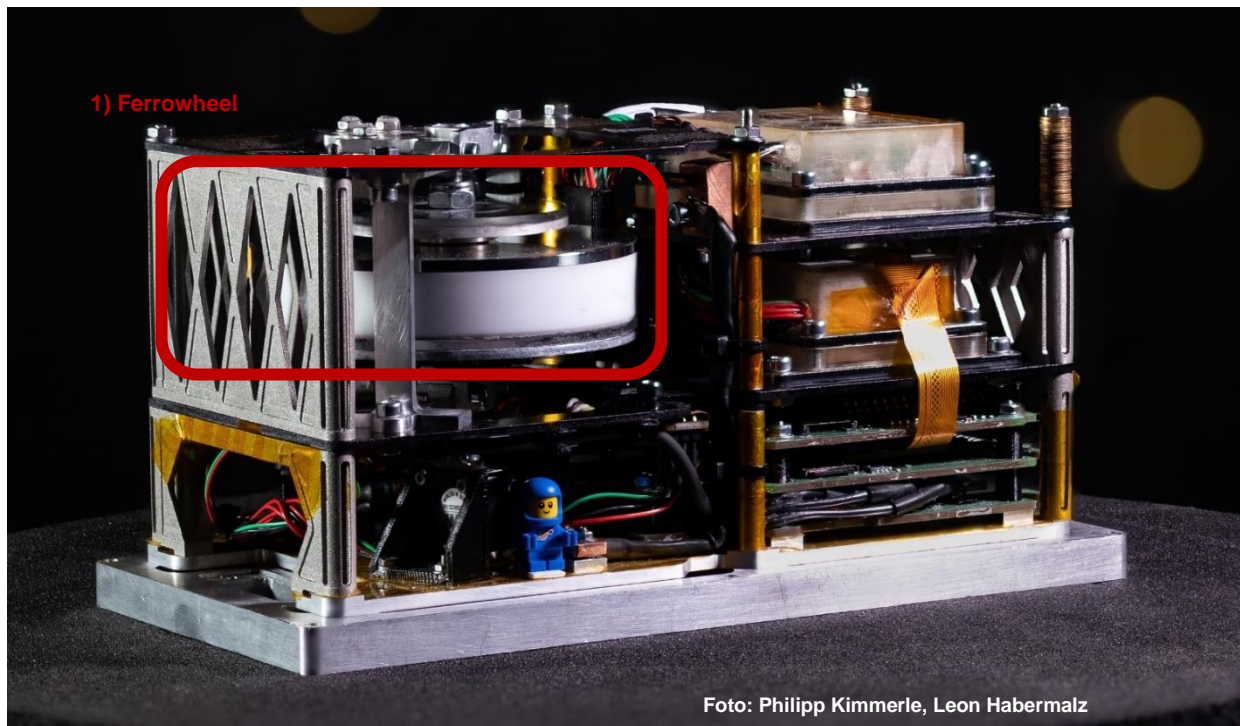


Foto: Philipp Kimmerle, Leon Habermalz

Abbildung 6 Flughardware des FARGO Experiments. Das Experiment ist eine autonome 2U Nutzlast, welches neben Ferrowheel Technologie (roter Kasten) noch weitere Ferrofluidtechnologieerprobungen erfolgreich von März bis April 2023 auf der ISS durchgeführt hatte. Das Projekt wurde maßgeblich von Mitgliedern der studentischen Kleinsatellengruppe der Universität Stuttgart (KSat e.V.) durchgeführt und vom IRS mit Kenntnissen aus dem FerrAC Projekt unterstützt.

Im Rahmen des "Überflieger 2"-Wettbewerbs der Deutschen Raumfahrtagentur im DLR konnte das Ferrowheel in einem Weltraumexperiment getestet werden. Dies wurde durch den Experimentvorschlag FARGO ermöglicht, der von einem Studententeam der Universität Stuttgart eingereicht wurde, siehe Abbildung 6. Das Ferrowheel, das speziell für Kleinsatelliten konzipiert ist, wurde erfolgreich auf der Internationalen Raumstation (ISS) im März 2023 erprobt. Nach Abschluss der ISS-Mission im April 2023 wurde die Nutzlast sicher zur Erde zurückgebracht, wodurch sie für weitere Nachuntersuchungen zur Verfügung stand.

Die Erfolge des FARGO Ferrowheels im Rahmen seiner Erprobung auf der Internationalen Raumstation (ISS) sind vielfältig und von hoher Relevanz für den FerrAC Erfolg.

Zunächst wurde die Funktionalität des Ferrowheels erfolgreich nach dem Start mit einer SpaceX Falcon 9 CRS-27 Rakete zur ISS im März 2023 bestätigt. Während des ISS-Aufenthalts konnte das Ferrowheel mehrfach in verschiedenen Experimenten gestartet werden, wobei verschiedene Zieldrehzahlen erfolgreich erreicht wurden. Ein Schlüsselergebnis war die Erreichung einer maximalen Betriebsdrehzahl von 1000 U/min. Bei dieser Drehzahl wurde für das Ferrowheel ein Drehmoment von 65 mN·m gemessen und ein Drehimpuls von 59 mN·m·s gespeichert. Diese Leistungswerte demonstrieren eindrucksvoll die Effektivität des Ferrowheels als Lageregelungssystem, welche gemäß den Analysen unseres Partners Astos passend sind für ein vergleichbares Reaktionsradsystem für einen Kleinsatelliten. Während des Betriebs auf der ISS wurde zudem ein reduzierter Energieverbrauch in Verbindung mit einer Temperaturerhöhung beobachtet. Dies deutet auf einen weiteren Aspekt verbesserter Effizienz des Systems im Vergleich zu herkömmlichen Lageregelungssystemen hin.

Eine weitere interessante Beobachtung war die Umverteilung des Ferrofluids bei hohen Drehzahlen, wie beispielsweise in Abbildung 7, Bild 2 und 3, ersichtlich ist. Trotz dieser Umverteilung blieb die

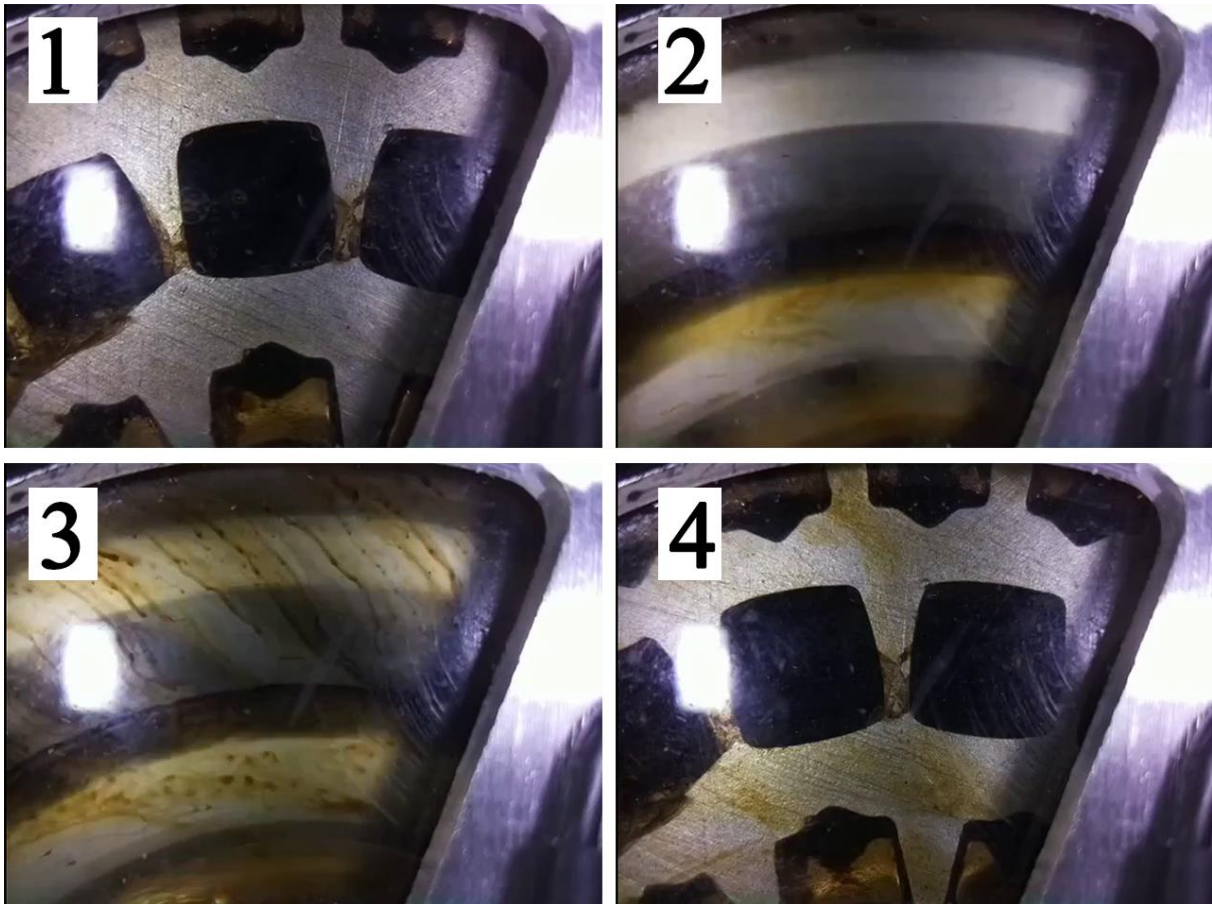


Abbildung 7 In Orbit Aufnahmen des FARGO Ferrowheels. 1) Systemanfangszustan – Permanentmagnete benetzt mit Ferrofluid als Lagerung sichtbar. 2) System im Betrieb bei moderater Drehzahl: Ferrofluid verschmiert 3) System im Betrieb bei Drehzahl nahe 1000 U/min: Ferrofluidtropfenströme bilden sich aus und fließen von außen nach innen. 4) Systemzustand nach Experimentbetrieb: Verschmierungen auf Rotor sichtbar, Ferrofluid wieder zurückverteilt.

Funktionalität des Ferrowheels unbeeinträchtigt, was seine Robustheit und Zuverlässigkeit unterstreicht. Nach der Rückführung zur Erde wurde festgestellt, dass die Funktionalität des Ferrowheels unverändert geblieben ist. Diese erfolgreiche Rückführung und die unveränderte Leistungsfähigkeit nach dem Einsatz im Weltraum bestätigen die Robustheit, Haltbarkeit und Zuverlässigkeit des Systems.

Insgesamt hat das FARGO Ferrowheel durch diese Tests auf der ISS einen Technologiereadinesslevel von 6/7 erreicht, was bedeutet, dass der Prototyp erfolgreich in einer weltraumrelevanten Umgebung erprobt wurde. Diese Ergebnisse stellen einen signifikanten Meilenstein in der Entwicklung von nicht-mechanischen Lageregelungssystemen dar.

Die Energieeffizienz und erreichbaren Leistungsparameter eines ferrofluidischgelagerten Lageregelungssystems waren ebenfalls im Fokus der Forschung. Das Design des Ferrowheels wurde optimiert, um hohe Drehzahlen bei minimalem Energieverbrauch zu erreichen. Als relevantes Beispiel ist Dies stellt einen wichtigen Schritt in Richtung energieeffizienterer und leistungsfähigerer Satellitenlageregelungssysteme dar.

Der aktuelle Drehzahlrekord wird von einem miniaturisierten Laborsystem mit einem SOBL23-1207 Stator gehalten [24]. Dieser Stator erreicht gemäß Datenblatt für diesen BLDC-Elektromotoreine maximale Leerlaufdrehzahl von 5730 U/min, wenn der zugehörige mechanischen Rotor verwendet wird. Bei Betrieb mit einem Ferrofluidlager-Rotor wurden ebenfalls 5730 U/min erreicht. Dies erforderte beim Start 12 V / ~500 mA, also eine Leistungsaufnahme von ungefähr 6 W. Sobald die Zieldrehrate erreicht war, benötigte das System 12 V / 102 mA, was zu einer Leerlauf-Leistungsaufnahme bei maximaler Drehzahl von 1,2 W führt. Daraus folgt, dass Systeme mit Ferrofluidlager in der Lage sind, quasi 100 % der mechanischen Leistung (d.h. gleiche Drehzahl) im Vergleich zu einem mechanischen

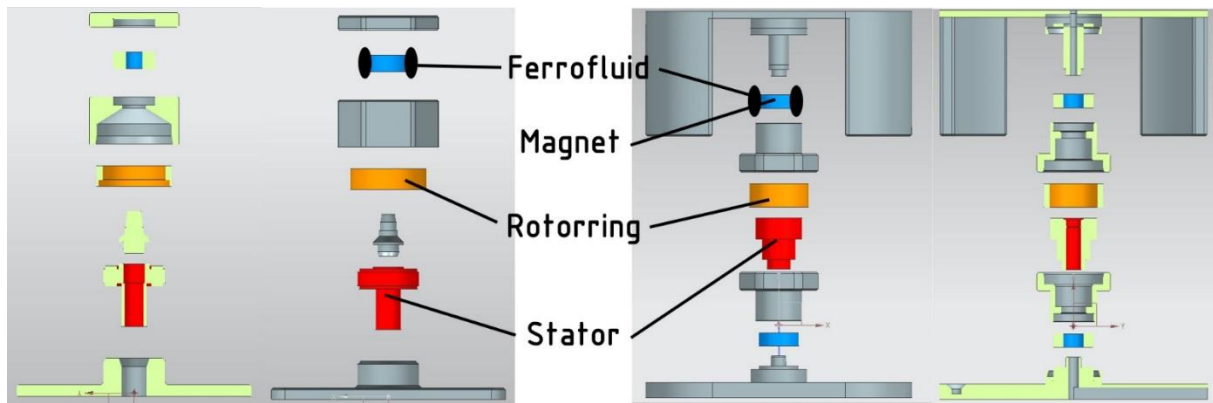


Abbildung 8 Vereinfachtes Ferrowheelkonzept mit maximierter COTS Nutzung, geringer Teileanzahl und vereinfachter Integration und Skalierbarkeit. Funktionale Trennung der magnetischen Einkopplung (über Rotorring) und der Lagerrung (Magnete in blau). Farbige Teile sind COTS, graue Komponenten Strukturteile welche z.B. additiv fertigbar sind. Skalierbare Schwungrad Option auf Rotorring (orange) nicht dargestellt. Konzept Links Reduktion auf einen lagernden Magneten (blau). Rechts: Reduktion auf zwei lagernde Magneten (blau).

System zu erreichen. Weiterhin gibt das Datenblatt des SBL23-1207 einen Leerlaufstrom von 127 mA bei einer angelegten Spannung von 12 V an, was darauf hindeutet, dass eine geringere Reibung des ferrofluidischen Lagers auch eine bessere Energieeffizienz im Leerlauf ermöglicht. Tests zur Bestimmung der maximalen und minimalen Drehzahl laufen weiter, um mehr Klarheit über das mögliche Betriebsfeld von Systemen mit Ferrofluidlager zu gewinnen. Aufgrund der geringen Reibung ferrofluidischer Lager ist es auch möglich diese bei geringer Drehzahl zu betreiben, was bei mechanischen Lagern zu Problem führt wenn diese in Bereichen von nicht-linearen Reibungseffekten führen. Falls ein Nulldurchgang, beispielsweise vom positiven zum negativen stabil gezeigt werden kann, ist dies als weiterer operativer Vorteil von Ferrowheels anzusehen. Ein start in die positive und negative Drehrichtung wurde bereits erfolgreich im Rahmen von FerrAC erprobt.

Zusätzlich strebte das Projekt ein modulares und skalierbares Design für das Ferrowheel an. Ziel war, eine Satellitenkomponente zu schaffen, die leicht an verschiedene Satellitendimensionen und Missionsanforderungen angepasst werden kann. Die nächste Iterationsstufe ist in Abbildung 8 dargestellt. Es zeigt die Möglichkeit der Funktionstrennung zwischen Lagerung und magnetischer Einkopplung, die weitgehende Nutzung von COTS Komponente, sowie eine Reduktion des Integrationsaufwandes. Der Ferrowheel-Rotor in Abbildung 4 D dargestellt benötigt beispielsweise über 50 Magnete welche präzise und korrekt polarisiert in drei Ringen positioniert und integriert werden müssen. Wie bei FARGO gezeigt, ist so ein System möglich aber benötigt einen nicht trivialen Aufwand bei gleichzeitiger Fehleranfälligkeit. Die Reduktion auf zwei oder sogar einen lagernden Magneten bindet die Präzision des entstehenden Ferrofluidlagers an die Produktionstoleranz des Permanentmagneten (siehe Abbildung 5). Skalierung eines solchen Systems kann über zahlreiche Parameter modifiziert werden, zum einen ist eine software-technische /elektrische flexible Steuerung möglich. Die Auswahl eines geeigneten COTS Motorstators definiert die Einspeisbare elektrische Leistung und damit das erzeugbare Drehmoment. Mit Motorwahl und/oder Schwungrad design kann die Drehzahl bzw. das Trägheitsmoment eingestellt werden und damit der maximal speicherbare Drehimpuls des Systems definiert werden. Technische Grenzen, die strenger sind als bei bisherigen COTS mechanischen Systemen vorliegen, sind derzeit nicht bekannt. Diese Flexibilität würde es ermöglichen, die Technologie in einer Vielzahl von Raumfahrtanwendungen einzusetzen.

Insgesamt verkörpert das FerrAC-Projekt einen bedeutenden Fortschritt in der Entwicklung von fortschrittlichen, effizienten und langlebigen Lageregelungssystemen für die Raumfahrt. Durch die Kombination von innovativen Konzepten wie Ferrowheels, Ferrofluidlagern und Energieeffizienz stellt es eine vielversprechende Alternative zu herkömmlichen mechanischen ACS dar.

Erzielte Ergebnisse

1. **Leistung des Ferrowheels:** Der ISS Prototyp erzielte ein Drehmoment von 65 mN m und eine Impulsspeicherung von 59 mN m s während des Starts mit einem Ziel-Drehzahlbereich von 800 bis 1000 U/min. Dies ist in guter Übereinstimmung mit der notwendigen Leistung eines Reaktionsrades wie es für einen Kleinsatelliten benötigt wird.
2. **Energieeffizienz:** Ferrofluidlagerte Systeme erreichten hohe Drehzahlen von über 5000 U/min und zeigten eine verbesserte Energieeffizienz im Vergleich zu mechanischen Systemen. Der Vorteil bei der Energieaufnahme bei maximaler Drehzahl lag bei 10-20% und verstärkte sich über die Betriebsdauer, da sich mit steigender Temperatur die Viskosität und damit die Reibungsverluste des Systems weiter verringerten.
3. **Verschleißfreiheit:** Durch die Verwendung von Ferrofluiden als tragende Elemente konnte das System ohne mechanische Kontaktflächen und damit ohne Verschleiß betrieben werden.
4. **Designoptimierung:** Die nächste Iteration des Ferrowheel fokussiert auf eine weitere Effizienzsteigerung, eine Vereinfachung des Designs und eine erhöhte Modularität.

Schlussfolgerungen

Das FerrAC-Projekt demonstriert einen signifikanten Fortschritt in der Entwicklung verschleißfreier Einstellungskontrollsysteme für Satelliten. Die erfolgreiche Demonstration des Ferrowheels im Weltraum zeigt das Potenzial dieser Technologie für zukünftige Raumfahrtanwendungen. Die Ergebnisse legen nahe, dass Ferrofluid-basierte Systeme eine praktikable Alternative zu konventionellen mechanischen ACS bieten könnten, insbesondere in Bezug auf Haltbarkeit und Energieeffizienz.

Mittelverwendung und projektzielrelevante Ergebnisbewertung

Die Verwendung der Zuwendung im FerrAC-Projekt und die erzielten Ergebnisse im Vergleich zu den vorgegebenen Zielen können wie folgt dargestellt werden:

Verwendung der Zuwendung

1. **Forschung und Entwicklung:** Ein signifikanter Anteil der Zuwendung wurde für Verbrauchsmaterialien, Produktions- und Messmittel zur Erforschung, Prototypenbau und experimentellen Untersuchung verschiedener Konzepte zur Magnetofluidbasierten Lageregelung verwendet. Dies mündete letztendlich in der Entwicklung und Erprobung einer Reaktionsrad alternative - dem Ferrowheel.
2. **Personalressourcen:** Mittel wurden für die Finanzierung des Projektteams, einschließlich Wissenschaftler, Ingenieure und technischer Mitarbeiter, insbesondere studentischer Hilfskräfte verwendet. Diese Ressourcen waren entscheidend für die erfolgreiche iterative Konzeption, Entwicklung und Testdurchführung.
3. **Infrastruktur und Ausrüstung:** Die Zuwendung ermöglichte den Kauf oder die Nutzung spezialisierter Ausrüstung und Laboreinrichtungen, die für die Entwicklung und die Arbeit mit den relevanten Flüssigkeiten und Konzepten erforderlich waren. Hier sind insbesondere moderne Produktionsmittel wie 3D-Drucker (FDM, SLA) sowie Verbrauchsmittel für Polyjetdruck zu nennen, welche sich in Qualität der erzeugten Produkte als auch den respektiven Kosten unterscheiden.

Erzielte Ergebnisse

Eine kurze Übersicht der Wissenschaftliche Errungenschaften des FerrAC Projekts

1. **Vertiefte Kenntnisse in der Ferrofluidforschung:** Das Projekt hat umfassendes Wissen über die Eigenschaften und Verhaltensweisen von Ferrofluiden in verschiedenen

Magnetfeldkonfigurationen (sowohl statisch als auch dynamisch) erarbeitet. Dazu gehören die Interaktionen von Ferrofluiden mit unmagnetischen Sekundärflüssigkeiten, deren Wechselwirkungen mit Strukturmaterialien und die praktische Anwendbarkeit in spezifischen Einsatzgebieten.

2. **Untersuchung magnetisierbarer Flüssigkeiten:** Verschiedene klassische Hydrocarbon-basierte Ferrofluide wurden hinsichtlich ihrer Viskosität, des Basismaterials (darunter Ester, synthetische und natürliche Öle) und der Menge der suspendierten Nanopartikel getestet. Zusätzlich erfolgte die Erprobung einer magnetorheologischen Flüssigkeit auf Flüssigmetallbasis (Galinstan, bestehend aus Gallium, Indium und Zinn) mit Mikrometer-großen Eisenpartikeln.
3. **Einfluss der Mikrogravitation auf ferrofluidische Systeme:** Durch die Erkenntnisse aus Weltraumexperimenten der Projekte PAPELL und FARGO wurde ein tiefes Verständnis für das Verhalten von Ferrofluiden unter Mikrogravitationsbedingungen entwickelt.
4. **Simulation und Modellierung:** Es wurden verschiedene Simulationstechniken untersucht, um das Verhalten von Ferrofluiden unter Einfluss unterschiedlicher Magnetfelder und Gravitationsbedingungen vorherzusagen.
5. **Publikationen und Wissensaustausch:** Die im Projekt erzielten Ergebnisse wurden kontinuierlich während und nach der Projektdauer auf Fachkonferenzen präsentiert. Veröffentlichungen in Fachjournalen befinden sich im Peer-Review Prozess oder sind noch in Vorbereitung.

Eine kurze Übersicht Technische Errungenschaften des FerrAC Projekts:

1. **Untersuchung von Konzepten für Ferrofluid-Lageregelung:** Entwicklung, Entwurf und Erprobung verschiedener Konzepte zur Satellitenlageregelung, die auf der magnetischen Manipulation von Flüssigkeiten basieren.
2. **Entwicklung Ferrofluid-basierter Lager:** Konzeptionierung und Implementierung von fluidischen Lagern, die Ferrofluidtechnologie nutzen, um mechanische Reibung im System zu eliminieren.
3. **Analyse Ferrofluid-basierter Lager:** Untersuchung des Potenzials von ferrofluidischen Lagern zur Reduzierung von Verschleiß und Wartungsbedarf in Raumfahrtssystemen.
4. **Prototypenentwicklung des Ferrowheels:** Auswahl und Entwicklung verschiedener Prototypen des ferrofluidisch gelagerten Reaktionsrades für die Satellitenlageregelung als vielversprechender Kandidat für ein effizientes und effektives System.
5. **Laborbasierte Tests und Validierung:** Umfassende Labortests zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit, Effizienz und Effektivitätsbewertung der entwickelten Ferrowheel-Prototypen.
6. **Entwicklung von Steuerungssoftware:** Erstellung spezialisierter Software für die Steuerung und Überwachung des Ferrowheels mit Hilfe von im Betrieb erzeugtem elektrischem Feedback.
7. **Evaluierung der Energieeffizienz:** Analyse und Optimierung des Energieverbrauchs der Ferrowheel-Prototypen und Bestimmung des erreichbaren Betriebsbereichs.
8. **Optimierung für Weltraumbedingungen:** Anpassung der Prototypen für den Einsatz unter Weltraumbedingungen, einschließlich Mikrogravitation und Sicherheitsaspekten, autonomen Betriebs, sowie Berücksichtigung der Belastungen durch einen orbitalen Raketenstart.
9. **Experimente unter realen Bedingungen auf der ISS:** Durchführung von Experimenten und Systemtests im Rahmen des FARGO-Projekts auf der ISS zur Überprüfung der Leistung und Zuverlässigkeit des Ferrowheels.
10. **Datenanalyse und Ergebnisauswertung:** Anwendung geeigneter Methoden zur Auswertung der im Weltraum gesammelten Daten zur Quantifizierung des erzeugbaren Drehmoments und der Drehimpulsspeicherfähigkeit des Ferrowheels.
11. **Anpassungen basierend auf ISS-Testergebnissen:** Verbesserung und Vereinfachung des Systemkonzepts basierend auf den Ergebnissen der Weltraumtests zur weiteren Steigerung der Effizienz und Systemvereinfachung.

12. **Kleinserienfertigung:** Aufgrund zahlreicher und schnell zu bauenden Prototypen, Aufbau von Expertise in der Kleinserienfertigung. Kombination aus geeigneten externen Dienstleistern und Eigenfertigung, gepaart mit einfach iterierbaren Konzepten ermöglicht maßgeblich eine effektiven und adaptive Kleinserienproduktion.

Gegenüberstellung mit den vorgegebenen Zielen

- **Zielerreichung:** Die im Projekt gesetzten Ziele wurden weitestgehend erreicht. Insbesondere die Entwicklung und Weltraum-Erprobung des Ferrowheels stellt ein Übertreffen der ursprünglichen Projektziele dar.
- **Herausforderungen und Anpassungen:** Trotz einiger Herausforderungen, wie den Einschränkungen durch die COVID-19-Pandemie, die zu Anpassungen im Projektverlauf führten, konnte das Projekt erfolgreich abgeschlossen werden.
- **Innovation und Technologietransfer:** Das Projekt hat bedeutende Innovationen im Bereich der Raumfahrttechnologie hervorgebracht und zur Stärkung des Technologietransfers zwischen Forschung und Industrie beigetragen.

Insgesamt zeigt die Gegenüberstellung, dass das FerrAC-Projekt die gesteckten Ziele durch effektive Nutzung der bereitgestellten Mittel erreicht hat und bedeutende Beiträge zur Raumfahrttechnologie und wissenschaftlichen Forschung geleistet hat.

2.1. Zahlenmäßiger Nachweis

Siehe beigefügter Anlage des zahlenmäßigen Nachweis der projektbezogenen Einzelausgaben.

2.2. Notwendigkeit und Angemessenheit der durchgeführten Arbeit

Die Entwicklung von Lageregelungssystemen ohne mechanische Schnittstellen, wie sie im FerrAC-Projekt verfolgt wird, ist nicht nur ein signifikanter Fortschritt in der Raumfahrttechnologie, sondern auch eine notwendige und angemessene Anstrengung. Diese Art der Forschung erfordert eine umfassende Untersuchung zahlreicher Konzepte und die Durchführung einer Vielzahl von Iterationen für jedes Konzept, um die bestmöglichen Lösungen zu finden.

Diese nachhaltigen sowie vertieften Forschungs- und Entwicklungsprozesse sind entscheidend, da traditionelle Lageregelungssysteme, die auf mechanischen Komponenten basieren, anfällig für Verschleiß und damit verbundene Ausfälle sind. Die Entwicklung von Systemen ohne mechanische Schnittstellen zielt darauf ab, diese Schwächen zu überwinden, indem sie die Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Satelliten verbessert und gleichzeitig den Energieverbrauch optimiert.

Die Notwendigkeit, eine Reihe vielversprechender Konzepte zu erkunden und zu verfeinern, spiegelt die Komplexität und Herausforderung wider, die mit der Entwicklung von innovativen, robusten und effizienten Lageregelungssystemen einhergehen. Jede Iteration trägt zum tieferen Verständnis der zugrundeliegenden physikalischen Prinzipien bei und hilft, die Technologie zu verbessern und an die spezifischen Anforderungen der Raumfahrt anzupassen.

Zusammenfassend ist die umfangreiche und sorgfältige Arbeit, die in die Entwicklung von Lageregelungssystemen ohne mechanische Schnittstellen investiert wird, sowohl notwendig als auch angemessen. Sie ist ein entscheidender Bestandteil des Prozesses, um zuverlässige, effiziente und langlebige Systeme für die Raumfahrt zu schaffen. Diese Forschung trägt wesentlich zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Satelliten bei und erhöht die Zuverlässigkeit von Raumfahrtmissionen. Durch die intensive Entwicklungsarbeit im Rahmen von FerrAC hat sich auch die Gelegenheit des FARGO Experiments und damit erst die Qualifizierung des Prototypen auf der ISS ergeben. Ohne diese Vorarbeiten wäre ein solches studentisches Projekt nur schwierig umsetzbar gewesen.

2.3. Verwertungsplan

Der Verwertungsplan für das FerrAC-Projekt umfasst verschiedene Dimensionen, darunter kommerzielle, technologische und ausbildungsbezogene Aspekte:

1. Kommerzielle Aspekte:

- Eine Ausgründung zur kommerziellen Nutzung der Ferrowheel-Technologie ist vorgesehen. Diese Ausgründung zielt darauf ab, die entwickelte FerrACTechnologie auf den Markt zu bringen und kommerziell für mindestens den CubeSat aber auch den Kleinsatellitenmarkt zu verwerten.
- Alternativ besteht die Möglichkeit, dass Astos Solutions GmbH die Technologie kommerziell verwertet. Dies würde vermutlich eine schnellere Anwendung und Vermarktung der im Projekt entwickelten Innovationen ermöglichen, da diese bereits ein etablierter Marktteilnehmer in der Raumfahrt darstellen.

2. Technologische und akademische Aspekte:

- Die Weiterentwicklung des Ferrowheels im Hinblick auf Leistungssteigerung ist ein mögliches der weiteren Verwertung. Dies umfasst vor allem die Optimierung bestehender Ansätze um die maximale Leistungsfähigkeit des Systems weiter zu erhöhen. Idealerweise über den üblichen Einsatzbereich kommerzieller mechanischer Systeme hinaus.
- Die mögliche Anwendung der FerrAC-Technologie für die Entwicklung verschleißfreier Gyroskope wird in Erwägung gezogen, vorausgesetzt, es stehen entsprechende Fördermittel zur Verfügung.
- Die gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse aus dem FerrAC-Projekt werden für die allgemeine Entwicklung von Ferrofluidtechnologien genutzt werden. Dies beinhaltet potentielle Anwendungen in Bereichen wie Pumpen, Dichtungen, Durchführungen, Robotik, Magnetorquer und Thermalkontrolle uvm.
- Die Erprobung der Ferrowheel-Technologie auf Weltraummissionen, insbesondere auf bevorstehenden CubeSat-Missionen des Instituts für Raumfahrtssysteme der Universität Stuttgart, wie BW-next und SOURCE2, ist geplant und würde damit ein TRL8/9 erreichen.
- In Kooperation mit der Technischen Universität Berlin ist eine Übersichtsveröffentlichung geplant, um die Forschungsergebnisse einem breiteren wissenschaftlichen Publikum zugänglich zu machen.

3. Ausbildungsaspekte:

- Die Ausbildung von Studierenden der Universität Stuttgart wird durch praktische Arbeiten, Workshops, Vorlesungen und Seminare im Rahmen des Studiums gefördert. Dabei wird ein besonderer Fokus auf praktische Erfahrungen und Anwendung der FerrAC-Technologie im speziellen und Ferrofluiden in der Weltraumanwendung im Allgemeinen gelegt.
- Praktische Projekte, die auf Ferrofluidtechnologien basieren, wie beispielsweise REXUS/BEXUS oder der Überflieger-Wettbewerb, werden angestrebt, sofern die Bewerbungen erfolgreich sind. Diese Projekte bieten Studierenden die Möglichkeit, praktische Erfahrungen in realen Projektumgebungen zu sammeln und ihre Kenntnisse in der Anwendung von Ferrofluidtechnologien zu vertiefen.

Insgesamt zielt der Verwertungsplan darauf ab, die im FerrAC-Projekt entwickelten Technologien und Erkenntnisse umfassend zu nutzen und weiterzuentwickeln, sowohl im kommerziellen als auch im akademischen und bildungsbezogenen Kontext.

2.4. Arbeiten anderer Stellen

Während der Arbeiten von FerrAC sind folgenden Arbeiten anderer Stellen bekannt geworden. Diese Arbeiten werden im folgenden kurz beschrieben und eine kurze Einschätzung des jeweiligen Projekts gegeben.

2.4.1. **KrakSat** ist ein polnischer Cubesat, der für Bildungs- und Technologiezwecke von der AGH-Universität für Wissenschaft und Technologie sowie SatRevolution entwickelt wurde. Es handelt sich um einen 1U CubeSat, der von Studenten der AGH-Universität für Wissenschaft und Technologie in Krakau entwickelt wurde. Der Satellit basiert auf dem SR-NANO-BUS, der von SatRevolution bereitgestellt wird. Das Ziel der Mission ist es, die Machbarkeit eines auf Ferrofluid basierenden Einstellungskontrollsystems zu bewerten, ein Reaktionsrad, das von Mitgliedern der Studentenforschungsgruppe "Integra" an der AGH-Universität für Wissenschaft und Technologie entworfen wurde. KrakSat hat eine Masse von 1 kg [1], [2].

Die Erprobung des ferrofluidischen Reaktionsrades auf KrakSat konnte leider nicht durchgeführt werden, da der CubeSat kurz nach Start elektrische Probleme aufwies und kurz danach nicht mehr responsiv war. Nach techn. Verständnis handelt sich beim KrakSat ferrofluid Reaktionsrad um ein vollständig mit Ferrofluid gefüllter Torus, was physikalisch keine oder nur extrem geringe Rotationsgeschwindigkeiten hervorbringen kann.

2.4.2. Das Projekt **Fluid Dynamic Actuator (FDA)** der Technischen Universität Berlin startete im Jahr 2017 mit der Mission TechnoSat [1]. Der FDA ist eine Art Lageregelungsaktuator, der prinzipiell sehr ähnliche Eigenschaften aufweist wie die technologische Zielsetzung des FerrAC Projekts. Es handelt sich aber um eine MHD, anstatt einer ferrofluidischen Aktuierung. Der FDA bietet ein vergleichsweise hohes Drehmoment, hat aber im Vergleich zu Reaktionsrädern (RWs) nur begrenzte Fähigkeiten zur Speicherung von Drehimpuls [2]. Da es ein fluidisches System ohne bewegliche Teile ist, ist dieses vergleichsweise simpel und wartungsarm. Diese Eigenschaften machen ihn zu einer interessanten Alternative oder Ergänzung zu herkömmlichen Reaktionsrädern in Satellitensteuerungssystemen.

Eine Magnetohydrodynamische (MHD) Pumpe ist ein Gerät, das Flüssigkeiten unter Ausnutzung von Magnetfeldern und elektrischen Strömen bewegt. Sie basiert auf dem Prinzip der Magnetohydrodynamik, bei dem ein magnetisches Feld auf eine elektrisch leitfähige Flüssigkeit (z.B. Plasma, Salzlösung oder Flüssigmetall) angewendet wird. Wenn ein elektrischer Strom durch diese Flüssigkeit fließt, erzeugt das Wechselspiel zwischen Strom und Magnetfeld eine Lorentzkraft, die die Flüssigkeit in Bewegung setzt. MHD-Pumpen haben keine beweglichen Teile, was sie ideal für Anwendungen macht, in denen herkömmliche Pumpen versagen könnten. Zur Anwendung kommt hier Galinstan, dessen Hauptbestandteil Gallium ist, was eigene Herausforderungen und Risiken in der Raumfahrt mit sich bringt.

Das Phänomen der Versprödung von Aluminium und anderen Metallen durch Gallium ist ein interessanter und wichtiger Aspekt in der Materialwissenschaft. Gallium hat die einzigartige Eigenschaft, dass es an der Oberfläche vieler Metalle, einschließlich Aluminium, diffundieren kann. Diese Fähigkeit führt zu einer Reihe von Auswirkungen:

1. **Diffusion an der Grenzfläche:** Gallium dringt entlang der Korngrenzen in das Metall ein, was zu einer strukturellen Schwächung führt. Dieser Prozess kann bei Raumtemperatur erfolgen, da Gallium einen sehr niedrigen Schmelzpunkt von etwa 29,76 °C hat.
2. **Korngrenzenversprödung:** Durch die Diffusion von Gallium entlang der Korngrenzen verändert sich die Struktur des Metalls auf mikroskopischer

- Ebene. Das Gallium kann die Bindungen zwischen den Metallatomen schwächen, was zur Versprödung des Materials führt. Bei Aluminium beispielsweise kann dies zu einem deutlichen Verlust der mechanischen Integrität führen.
3. **Schnelle Rissausbreitung:** In einigen Fällen kann die Anwesenheit von Gallium in Aluminium oder anderen Metallen zur schnellen Ausbreitung von Rissen führen. Dies ist besonders problematisch in strukturellen Anwendungen, wo die Integrität des Materials von entscheidender Bedeutung ist.
 4. **Anwendung in Experimenten:** Dieses Phänomen wird oft in wissenschaftlichen Experimenten und Demonstrationen verwendet, um die Wirkung von Korngrenzenversprödung zu zeigen. Ein Stück Aluminium kann beispielsweise nach der Behandlung mit Gallium so brüchig werden, dass es mit bloßen Händen gebrochen werden kann.

Diese Eigenschaften von Gallium machen es sowohl zu einem interessanten Forschungsobjekt als auch zu einer potenziellen Herausforderung in Anwendungen, in denen Gallium mit anderen Metallen in Kontakt kommen kann, wie beispielsweise in der Elektronik oder in der Raumfahrt, insbesondere bei Auftreten von Lecks.

2.4.3. An der Universität Bremen werden **Thermalkontrollsysteme** entwickelt, welche im Sinne der Verschleißfreiheit mit Hilfe von ferrofluidischen Effekten Konvektion erzwingen [1], [2]. Wie auch in FerrAC untersucht sind Pumpen immer auch Fähigkeit Drehmomente zu erzeugen als auch Drehimpulse zu speichern, während die Flüssigkeit in Bewegung ist oder deren Bewegungszustand geändert wird.

Eine aktuelle Entwicklung untersucht das Konzept einer MiSS-Pumpe für die Thermalkontrolle vor. Eine **Magnetic Surface Stress Pump** (MiSS-Pumpe) ist eine innovative Art von Pumpe, die ein Ferrofluid nutzt, um Flüssigkeiten ohne mechanische bewegliche Teile zu bewegen. Das grundlegende Funktionsprinzip beruht auf der Nutzung von magnetischen Feldern, um Spannungen an der Oberfläche einer ferromagnetischen Flüssigkeit zu erzeugen, wodurch eine Strömung der Flüssigkeit entsteht.

Die Schlüsselaspekte einer MiSS-Pumpe umfassen:

1. **Ferrofluid:** Das Herzstück der Pumpe ist ein Ferrofluid, eine Flüssigkeit, die kleine magnetische Partikel enthält. Diese Partikel reagieren auf externe Magnetfelder.
2. **Magnetfelderzeugung:** Die Pumpe verwendet Magnetfelder, um die Partikel im Ferrofluid zu manipulieren. Durch das Anlegen eines rotierenden oder veränderlichen Magnetfeldes wird eine Kraft auf die magnetischen Partikel ausgeübt.
3. **Oberflächenspannung:** Die Bewegung der magnetischen Partikel erzeugt Spannungen an der Oberfläche des Fluids. Diese Spannungen führen zu einer Strömung im Fluid, die für den Pumpvorgang genutzt wird.
4. **Keine mechanischen Teile:** Ein wesentlicher Vorteil der MiSS-Pumpe ist das Fehlen mechanischer beweglicher Teile, was sie ideal für Anwendungen macht, bei denen herkömmliche Pumpen anfällig für Verschleiß und Ausfall sein könnten.
5. **Einsatz in Mikrogravitation:** Besonders interessant ist die Anwendung in Mikrogravitationsumgebungen, wie sie im Weltraum vorkommen. Hier bieten MiSS-Pumpen eine zuverlässige Möglichkeit, Flüssigkeiten zu handhaben, ohne auf herkömmliche, mechanisch anfälligere Pumpsysteme angewiesen zu sein.

Insgesamt bieten MiSS Pumpen ein einzigartiges und effizientes Mittel, um Flüssigkeiten in verschiedenen Umgebungen, insbesondere in der Raumfahrt, zu bewegen und zu steuern. Die rein fluidischen Systemkonzepte die im Rahmen von FerrAC untersucht wurden können auch als eine Art MiSS Pumpe klassifiziert werden, da hier unmagnetisches Sekundärfluid mit

Oberflächenspannungseffekten bewegt wird. Letztenendes sind solche Systeme aber aufgrund der begrenzten Einkopplung magnetischer und damit Druckkräfte nicht für effektive Lageregelungssystem geeignet, sondern besser als Anwendungskonzept in der Thermal-kontrolle von Raumfahrzeugen zu sehen.

2.5. Veröffentlichungen

Alle Veröffentlichungen sind, wenn urheberrechtlich erlaubt, öffentlich und kostenlos zugänglich und können beispielsweise auf Researchgate.net gefunden werden.

Konferenzbeiträge:

1. Schäfer, F., Ehresmann, M., Herdrich, G., & Fasoulas, S. (2020). Update on the development of FerrAC: The mechanic-free attitude control system. IAC-20-B4,6A,3,x61100. In 71st International Astronautical Congress (IAC) – The CyberSpace Edition, October 12-14, 2020.
2. Breitenbücher, L., Sütterlin, S., Ehresmann, M., Schäfer, F., Herdrich, G., & Fasoulas, S. (2020). Assessment of Ferrofluid interaction with secondary liquids. IAC-20,A2,2,2,x59217. In 71st International Astronautical Congress (IAC) – The CyberSpace Edition, October 12-14, 2020.
3. Korn, C., Schäfer, F., Ehresmann, M., & Herdrich, G. (2021). Design and Manufacture of a Torque Measuring Test-Bed for Experimental Attitude Control Actuators. IAC-21-A2.5.8.x62708. In Institute of Space Systems, University of Stuttgart.
4. Schäfer, F., Ehresmann, M., Zajonz, S., Grossmann, S., Gutierrez, E., Heinz, N., O'Donohue, M., Korn, C., Herdrich, G., Gente, J., Gkoutzos, D., Levi, D., Weikert, S., & Wiegand, A. (2022). Ferrofluid-based attitude control for small satellites. IAC-22-B4,6A.7,x73209. In 73rd International Astronautical Congress (IAC), Paris, France, September 18-22, 2022
5. Ehresmann, M., Sütterlin, S., Bölke, D., Hein, N., O'Donohue, M., Remane, Y., Kreul, P., Schneider, M., Korn, C., Dietrich, J., Wank, B., Zajonz, S., Kob, M., Grossmann, S., Philipp, D., Turco, F., Buchfink, M., Steinert, M., Acker, D., Gutierrez, E., Karahan, B., Wagner, A., Hofmann, S., Ruffner, S., Herdrich, G., & Fasoulas, S. (2023). An innovative wearless attitude control actuator based on ferrofluid manipulation tested on the ISS. Presented at the 34th International Symposium on Space Technology and Science, Kurume, Japan, June 2023.
6. Ehresmann, M., Hein, N., Sütterlin, S., Acker, D., Gutierrez, E., Karahan, B., Kreul, P., Kob, M., O'Donohue, M., Philipp, D., Remane, Y., Ruffner, S., Schneider, M., Steinert, M., Bölke, D., Dietrich, J., Hofmann, S., Turco, F., Großmann, S., Korn, C., Wagner, A., Wank, B., Zajonz, S., Herdrich, G., Gente, J., Gkoutzos, D., Levi, D., Weikert, S., & Wiegand, A. (2023). Final Results of the novel ACS development project FerrAC. IAC-23,B4,6A,1,x79877. In 74th International Astronautical Congress (IAC), Baku, Azerbaijan, October 2-6, 2023

Abschlussarbeiten:

Abschlussarbeiten mit direktem FerrAC-Bezug wurden folgende durchgeführt:

1. Heinz, N. (2020). Konzeptionelle Untersuchung einer Zylinderpumpe basierend auf Ferrofluidmanipulation [Concept study of a piston pump based on ferrofluid manipulation]. Bachelorarbeit, Universität Stuttgart.
2. Breitenbücher, L. (2020). Untersuchung von Ferrofluidinteraktion mit Sekundärflüssigkeiten [Assessment of Ferrofluid interaction with secondary liquids]. Bachelorarbeit, Universität Stuttgart.

3. Korn, C. (2020). Entwurf und Konstruktion einer Vorrichtung zur Untersuchung von Drehmomenten experimenteller Lageregelungsaktuatoren [Design and Manufacture of a Torque Measuring Test-Bed for Experimental Attitude Control Actuators]. Bachelorarbeit, Universität Stuttgart

Aus dem Projekt FARGO sind zahlreiche Veröffentlichungen im Bezug auf die Ferrowheel Technologie des FerrAC Projects getätigt worden, der Fokus liegt hier auf die Entwicklung für die Erprobung der Technologie während des ISS-Experiments FARGO.

1. Dietrich, J., Kob, M., Zajonz, S., Korn, C., Karahan, B., Sütterlin, S., Heinz, N., Bölke, D., Großmann, S., Philipp, D., Turco, F., Buchfink, M., O'Donohue, M., Remane, Y., Kreul, P., Schneider, M., Steinert, M., Gutierrez, E., Acker, D., Ruffner, S., Wagner, A., Hofmann, S., Wank, B., Schäfer, F., Ehresmann, M., & Herdrich, G. (2023). Scientific Results of FARGO - A Verification of Novel Ferrofluid Systems on the ISS. IAC-23-D1,3,5,x78585. In 74th International Astronautical Congress (IAC), Baku, Azerbaijan, October 2-6, 2023.
2. Heinz, N., Sütterlin, S., Ehresmann, M., Bölke, D., Schäfer, F., O'Donohue, M., Remane, Y., Kreul, P., Schneider, M., Korn, C., Dietrich, J., Kob, M., Zajonz, S., Wank, B., Turco, F., Großmann, S., Buchfink, M., Philipp, D., Acker, D., Hofmann, S., Gutierrez, E., Steinert, M., Karahan, B., Ruffner, S., Wagner, A., & Herdrich, G. (2023). The Student Project FARGO - A Ferrofluid Experiment on the ISS. IAC-23-E2,3-GTS.4,5,x77873. In 74th International Astronautical Congress (IAC), Baku, Azerbaijan, October 2-6, 2023.
3. Zajonz, S., Korn, C., Großmann, S., Dietrich, J., Kob, M., Philipp, D., Turco, F., Steinert, M., O'Donohue, M., Heinz, N., Gutierrez, E., Wagner, A., Bölke, D., Sütterlin, S., Schneider, M., Remane, Y., Kreul, P., Wank, B., Buchfink, M., Acker, D., Hofmann, S., Karahan, B., Ruffner, S., Ehresmann, M., Schäfer, F., & Herdrich, G. (2023, September). FERROFLUID REACTION WHEEL DEVELOPMENT AND IN-ORBIT VERIFICATION. In Deutscher Luft-und Raumfahrtkongress 2023. Stuttgart, Germany
4. Vogt, C., Dietrich, J., Karahan, B., Steinert, M., Bölke, D., Heinz, N., Sütterlin, S., Junker, F., Rossetto, M., Weiß, L., Heuser, P., Wolff, P., Kimmerle, P., Habermalz, L., Wagner, A., Knoll, F., Himmelsbach, E., Acker, D., Gutierrez, E., Herkenhoff, M., O'Donohue, M., Remane, Y., Schneider, M., Kreul, P., Korn, C., Zajonz, S., Kob, M., Wank, B., Großmann, S., Philipp, D., Turco, F., Buchfink, M., Ruffner, S., Ehresmann, M., Schäfer, F., & Herdrich, G. (2023, September). FERRAS & FARGO: FERROFLUID STUDIES FOR NOVEL SPACE APPLICATIONS. In Deutscher Luft-und Raumfahrtkongress 2023. Stuttgart, Germany.
5. Karahan, B., Kob, M., Sütterlin, S., Dietrich, J., Bölke, D., Steinert, M., Heinz, N., Gutierrez, E., Grossmann, S., Philipp, D., Turco, F., Buchfink, M., Korn, C., Zajonz, S., O'Donohue, M., Remane, Y., Kreul, P., Schneider, M., Acker, D., Ruffner, S., Hofmann, S., Wagner, A., Schäfer, F., Ehresmann, M., & Herdrich, G. (2023, June). Recent results of Ferrofluid ISS Experiments to enable Sustainable Space Activities. In 34th ISTS 2023 (International Symposium on Space Technology and Science). Kurume in Fukuoka, Japan.
6. Vogt, C., Bölke, D., Steinert, M., Sütterlin, S., Heinz, N., Karahan, B., Junker, F., Dietrich, J., Rossetto, M., Weiß, L., Heuser, P., Hohenberger, M., Wolff, P., Kimmerle, P., Habermalz, L., Wagner, A., Knoll, F., Himmelsbach, E., Acker, D., Gutierrez, E., Ruffner, S., Herkenhoff, M., Korn, C., Zajonz, S., O'Donohue, M., Schneider, M., Remane, Y., Kreul, P., Kob, M., Wank, B., Grossmann, S., Philipp, D., Turco, F., Buchfink, M., Hofmann, S., Ehresmann, M., Schäfer, F., & Herdrich, G. (14th IAA SSEO Symposium). Technology demonstration of novel ferrofluidic systems as mission enablers. IAA-B14-0604. In 14th IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation, Berlin, Germany.
7. Zajonz, S., Korn, C., Großmann, S., Dietrich, J., Kob, M., Philipp, D., Turco, F., Steinert, M., O'Donohue, M., Heinz, N., Gutierrez, E., Wagner, A., Bölke, D., Sütterlin, S., Ehresmann,

M., Schäfer, F., & Herdrich, G. (2023, April). Development of a Ferrofluid-Based Attitude Control Actuator for Verification on the ISS. In 19th Pegasus Student Conference 2023. Rome, Italy.

8. Sütterlin, S., Bölke, D., Ehresmann, M., Schäfer, F., O'Donohue, M., Heinz, N., Korn, C., Dietrich, J., Turco, F., Großmann, S., Acker, D., Hofmann, S., Schneider, M., Remane, Y., Kreul, P., Kob, M., Wank, B., Zajonz, S., Philipp, D., Buchfink, M., Karahan, B., Steinert, M., Gutierrez, E., Breitenbücher, L., Herdrich, G., & Fasoulas, S. (2022, September). FARGO - VALIDATION OF SPACE-RELEVANT FERROFLUID APPLICATIONS ON THE ISS. In 71st Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (DLRK). Dresden, Germany.

Externe Vorträge:

Mit Interesse an den FerrAC-Entwicklungsarbeiten wurde von dritter Stelle zu entsprechenden Vorträgen eingeladen und gehalten:

1. ZARM Bremen - Seminar: Fluids and Space Engineering, 2019
2. TU Berlin - Vorlesung Ferrofluidische Aktuatoren, Satellitenentwurfsseminar, 2023

Veröffentlichungen in Form von Patentanmeldungen:

Mit direktem Projektbezug zu FerrAC befindet sich ein EP-Patent in der Anmeldung: [DE] Vorrichtung zur Erzeugung eines variablen Drehimpulses, insbesondere zur Lageregelung von Raumfahrzeugen, [EP000003904220A4](#)

Mit indirektem Bezug zu FerrAC hat sich außerdem ein weiteres DE-Patent aus Nebenentwicklungen ergeben:

[DE] Schaltvorrichtung zum Schalten elektrischer und/oder thermischer Lasten mit Hilfe magnetisierbarer Flüssigkeit, [DE102022109433A1](#)